第 37 卷第 13 期 2017 年 7 月 | 生 态 学 报 ACTA ECOLOGICA SINICA | Vol.37,No.13 Jul.,2017

DOI: 10.5846/stxb201412052409
黄家俊,张强,张生,陈晓宏.基于信息熵的新疆降水时空变异特征研究.生态学报,2017,37(13):4444-4455.
Huang J J, Zhang Q, Zhang S, Chen X H.Information entropy-based analysis of spatial and temporal variation in precipitation in Xinjiang.Acta Ecologica Sinica,2017,37(13):4444-4455.

基于信息熵的新疆降水时空变异特征研究

黄家俊[1],张 强[2,3,4,*],张 生[5],陈晓宏[1]
1 中山大学,水资源与环境系,广州 510275
2 北京师范大学,环境演变与自然灾害教育部重点实验室,北京 100875
3 北京师范大学,地理科学学部,北京 100875
4 北京师范大学,减灾与应急管理研究院,北京 100875
5 宿州学院环境与测绘工程学院,宿州 234000

摘要:基于信息熵理论对新疆降水序列的时空变异性进行研究。利用边际熵研究不同时间尺度降水序列的变化特征。利用分配熵和强度熵分别研究降水量和降水天数年内和年代际(10a)分配情况。利用改进的 Mann-Kendall 趋势检验法分析新疆降水过程不确定性变化趋势。研究表明:(1) 新疆降水量与降水天数年内分配不均匀性主要表现为由南向北减小的空间分布特征;(2) 新疆不同尺度的降水序列不确定性具有明显空间特征;(3) 越降水越稀少的地区,降水量与降水天数变异性就越大。本研究对该区域降水时空变异研究与水资源规划具有重要意义。

关键词:降水量;时空分布;变异性;信息熵

Information entropy-based analysis of spatial and temporal variation in precipitation in Xinjiang

HUANG Jiajun[1], ZHANG Qiang[2,3,4,*], ZHANG Sheng[5], CHEN Xiaohong[1]
1 *Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou* 510275, *China*
2 *Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*
3 *Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*
4 *Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*
5 *School of Environment and Surveying and Mapping Engineering, Suzhou University, Anhui* 234000, *China*

Abstract: The precipitation distribution is becoming highly unstable due to climate change and intensifying human interference. Therefore, estimations of the precipitation distribution are extraordinary important for understanding the hydrological cycle and are crucial for water resource management. In this study, variation in spatial and temporal characteristics of precipitation in Xinjiang was evaluated based on information entropy theory. Variation in the precipitation sequence for various time scales was confirmed using marginal entropy. Furthermore, the distribution in precipitation amounts and the number of days with precipitation within a year and among decades were systematically analyzed using apportionment and intensity entropy measures, respectively. A modified Mann-Kendall test was applied to detect trends in precipitation uncertainty in Xinjiang. This analysis provided a few key findings: (1) The spatial variation in both the amount of precipitation and the number of days with precipitation within a year decreased from South Xinjiang to North Xinjiang, indicating that South Xinjiang has obvious uncertainty with respect to both characteristics. Moreover, the spatial

基金项目:国家杰出青年科学基金(51425903);国家自然科学基金创新群体项目(41621061);香港特别行政区研究资助局资助项目(CUHK441313)
收稿日期:2014-12-05; **网络出版日期**:2017-02-23
*通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangq68@bn.edu.cn

and temporal distribution of precipitation amounts and the number of days with precipitation within a year were similar; the greatest variability in precipitation amount was observed during 1965—1973 and the greatest variability in the number of days with precipitation was observed in 1965, 1997, and 2007. (2) The uncertainty for various scales of the precipitation sequence in Xinjiang has obvious space structures. For example, South Xinjiang had greater uncertainty than North Xinjiang in the spring and autumn, while there was no obvious spatial distribution in the summer and winter. (3) The sparser the precipitation in a region, the greater the variation in the amount of precipitation and the number of days with precipitation. (4) Based on the apportionment disorder index for annual precipitation changes, most meteorological stations observed significant decreases, except the Ruoqiang Station, and these stations are mainly located in the southern area of South Xinjiang, the northern area of North Xinjiang, and the northern Tianshan area. This study improves our understanding of the spatial and temporal variation in precipitation and has implications for water resource management.

Key Words: precipitation; spatial and temporal distributions; variation; information entropy

以气候暖化为主要特征的全球气候变化导致水文循环加剧,改变了气象水文时空演变过程,导致降水、蒸发、地表及地下径流等时空分布变化[1-4]。近年来,如洪水、干旱等极端气象水文现象频现,且时空分布不均[5]。随着降水的时空不均匀性日益加剧,其对人们生活的不利影响越来越大,因此研究降水事件的时空变化规律,有助于科学理解极端灾害的时空分布,对减少灾害损失具有重要意义。以往的工作已经对降水的不均匀性进行了大量的研究。施能等[6]研究表明降水量在中低纬度大部分地区呈减少态势。Zhai 等[7]对中国1951—1995 年极端降水进行分析,认为中国降水天数显著减少,而降水强度有显著增加趋势。

新疆位于欧亚大陆中部,地处中国西北边陲,总面积为 $166.49\times10^4 km^2$,占全国陆地面积的六分之一。新疆地形复杂,气候上属于典型的干旱半干旱地区,生态系统脆弱[9]。对于新疆的降水已有一些研究,如杨莲梅[10]等研究表明,20 世纪 80 年代以后天山北麓及南麓极端降水量和频次显著增加,极端降水强度没有显著变化。薛燕等[11]和姜逢清等[12]指出近年来新疆降水量明显增加,有湿润化趋势[13]。张强等分析了新疆1960—2005 年降水过程的变化[14],采用 Copula 函数探讨了极端降水事件的概率分布特征[15],认为北疆容易发生极端强降水,南疆易发生极端弱降水;山区容易发生长历时强弱降水同现;平原容易同时发生从降水总量定义的极端强降水和极端弱降水。但是,基于信息熵理论,从时空两个角度来探讨新疆降水过程的变异性与不均匀性的相关研究尚未开展,基于此,本文基于信息熵理论与方法,探讨新疆降水过程的不均匀性,为该区域水资源管理与农业生产区划与规划提供重要科学依据与理论支撑。

1　数据

采用由国家气象局气候信息中心提供的新疆 51 个站点 1960—2005 年逐日降水资料(图 1),数据中缺测部分的处理方法如下[17]:对于 1—2d 缺测数据,采用相邻天数的平均降水量进行插值;对连续缺测天数较长(连续超过 2d 缺测)的情况,采用其他年份同样时期的平均降水量进行插值。本文对插值前和插值后的计算结果进行比较,相差甚微,说明缺测数据及插值方法对最终结果影响不显著。其中,编号为 1—33 的站点位于南疆,编号为 34—51 的站点位于北疆。

2　研究方法

2.1　信息熵理论

Shannon 在 1948 年提出了“信息熵”的概念,解决了对信息量的度量问题,随后 Singh 于 1997 年将熵运用于水文水资源问题的研究[1]。信息熵计算:

$$H(x) = -\sum_{k=1}^{K} p(x_k)\log_2[p(x_k)]$$

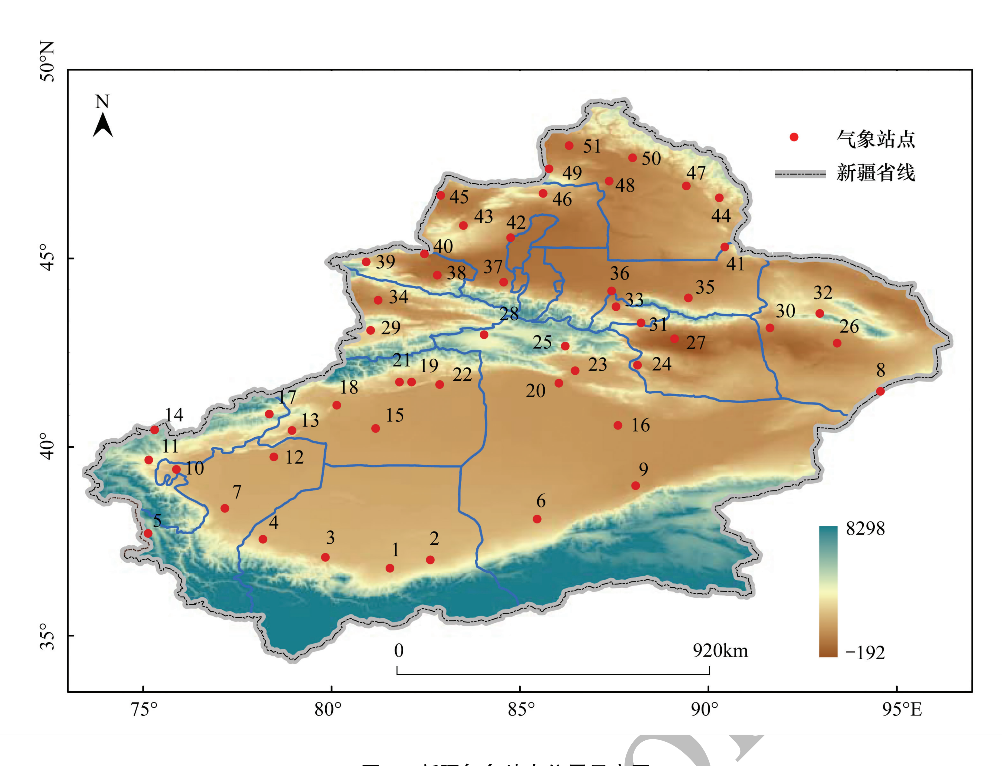


图 1 新疆气象站点位置示意图

Fig.1 Location of the meteorological stations of Xinjiang

式中,$H(X)$ 为熵值,K 为间隔数,x_k 为与 k 对应的事件,为事件发生的概率,熵值 $H(X)$ 也称为单变量 X 的边际熵。

熵是度量不确定性和无序性的一种方法,变量的不确定性越大,熵就越大,信息量也就越大。一个系统越有序,信息熵就越低;相反,一个系统越混乱,信息熵就越高。

2.1.1 边际熵(ME)

边际熵(ME)是具有概率分布 $p(X)$ 的随机变量 X 的平均信息量,用于度量不确定性。本文分别用年、季节、月份 3 个时间尺度计算降水序列的 ME,研究新疆降水的时空不确定性。可用公式(1)计算。

2.1.2 强度熵(*IE*)

强度熵(*IE*)用于估计各月降水强度。首先统计某年第 i 月降水天数 n_i ($i=1,2,3,\cdots,12$) 和全年降水天数 $N=\sum_{i=1}^{12} n_i$,再求概率 $p_i=n_i/N$,其中 $m=12$,则强度熵表示为:

$$IE=-\sum_{i=1}^{m}(n_i/N)\log_2(n_i/N) \tag{2}$$

2.1.3 分配熵(AE)

分配熵(AE)用于度量年降水量在各月分配的不均匀性。首先统计某年第 i 月的降水量 r_i ($i=1,2,3,\cdots,12$) 和全年的降水量 $R=\sum_{i=1}^{m} r_i$,其中 $m=12$。则分配熵表示为:

$$AE=-\sum_{i=1}^{m}(r_i/R)\log_2(r_i/R) \tag{3}$$

2.1.4 年代分配熵(DAE)

年代分配熵(DAE)用于度量 10 年间某降水序列的无序度,该序列可以为年、季或月序列。DAE 既可用于描述降水量分布的无序度,也可用来描述降水天数分布的无序度。若要描述年代降水量的无序度,首先统计第 i 年的降水量 a_i ($i=1,2,3,\cdots,10$),然后求出 10a 的总降水量 $DR=\sum_{i=1}^{10} a_i$,并求出 $d_i=a_i/DR$,则年代降

水量分布的年代分配熵表示为:

$$\mathrm{DAE} = \sum_{i=1}^{10} d_i \log_2 d_i \tag{4}$$

2.2 熵的变异性

熵的变异性用无序指数 *DI*(Disorder index)描述。*DI* 为熵的最大可能值与据实测数据计算的熵值的差。当全部事件发生概率均等时,信息熵达最大值[1]时包含的信息量最大,因此无序指数(*DI*)可用于表示序列的无序性。本文分别将边际熵(*ME*)、强度熵(*IE*)、分配熵(*AE*)、年代分配熵(DAE)和年代强度熵(DIE)计算所得的无序指数定义为边际无序指数(MDI)、强度无序指数(IDI)、分配无序指数(ADI)、年代分配无序指数(DADI)和年代强度无序指数(DIDI)。其中,边际熵(ME)、强度熵(IE)、分配熵(AE)、年代分配熵和年代强度熵(DIE)的最大可能值分别为:$ME_{max} = \log_2 10 = 3.3219$;$IE_{max} = \log_2 12 = 3.5850$;$AE_{max} = \log_2 12 = 3.5850$;$\mathrm{DAE}_{max} = \log_2 10 = 3.3219$;$\mathrm{DAE}_{max} = \log_2 10 = 3.3219$。例如,边际无序指数(Marginal disorder index,MDI)的计算公式为:

$$\mathrm{MDI} = ME_{max} - ME \tag{5}$$

式中,ME 为根据 3 个不同时间尺度计算降水序列(年、季节、月份)的边际熵。

无序指数越大,变异性就越大。时空变异性可通过平均无序指数(Mean disorder index)进行比较,即:

$$\mathrm{MDI} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} DI \tag{6}$$

式中,*N* 为熵序列长度。

2.3 趋势分析

本文所用趋势检验方法为改进的 Mann-Kendall 检验法(MMK)[18]。趋势变化是研究气候及水文序列变化规律的重要内容。Mann-Kendall 检验法最初由 Mann 和 Kendall 所提出,由于水文降水时间序列存在自相关性,使用 MK 检验法分析趋势会导致误差,水文序列的这种自相关性会对 Mann-Kendall 检验的结果造成影响。Hamed 和 Rao[19-20]考虑了水文序列中的自相关性,改进了 MK 法(本文简称为 MMK 法),这种改进的 MMK 法可以得到更为稳健的序列趋势分析结果[18],具体做法如下:

对于时间序列 $X = \{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$,首先计算其检验统计量 S 及其方差 $\mathrm{Var}(S)$:

$$S = \sum_{i=2}^{n}\sum_{j=1}^{i-1} \mathrm{sign}(X_i - X_j) \tag{7}$$

$$\mathrm{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n-5)}{18} - \sum_{j=1}^{m} \frac{t_j(t_j-1)(2t_j+5)}{18} \tag{8}$$

式中,sign( )为符号函数,m 为序列中秩次相同的组数,t_j 为第 j 组秩次相同所包含观测值的个数。当 $X_i - X_j$ 小于、等于或者大于零时, $\mathrm{sign}(X_i - X_j)$ 分别为-1,0,1;MK 统计量公式 S 大于、等于、小于零时分别:

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}} & (S < 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \tag{9}$$

式中,Z 为正值表示增加趋势,负值表示减少趋势。Z 的绝对值在大于等于 1.28,1.96,2.32 时分别通过了信度 90%、95%、99%显著检验。然后,计算基于序列秩次的趋势估计量 β :

$$\beta = median\,\frac{x_j - x_i}{j - i}\ (1 \leqslant i < j \leqslant n) \tag{10}$$

并从序列 $X = \{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$ 中祛除该趋势项,获得与原序列相应的平稳序列 $\{y_i\}_{i=1}^{n}$:

$$y_i = x_i - \beta \times i \tag{11}$$

然后,求序列 $\{y_i\}_{i=1}^{n}$ 对应的秩次序列,计算其自相关函数 $\rho_s(i)$ 。$\rho_s(i)$ 用 $r(i)$ 根据式估计:

$$r(i) = \frac{\sum_{k=1}^{n-i}(R_k - R)(R_{k+i} - R)}{\sum_{k=1}^{n}(R_k - R)^2} \tag{12}$$

式中,R_i 为 y_i 的秩次,R 为秩次的均值。最后依据 $r(i)$ 求解具有相关性序列的趋势统计量 S 的新方差 $Var^*(S)$:

$$\eta = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \times \sum_{i=1}^{n-1}(n-i)(n-i-1)(n-i-2)r(i) \tag{13}$$

$$\mathrm{Var}^*(S) = \eta \times \mathrm{Var}(S) \tag{14}$$

式中,$\mathrm{Var}(S)$ 为利用式(8)计算的假设序列独立情况下统计量 S 的方差估计量.将 $\mathrm{Var}^*(S)$ 带入式(9),求出 MMK 趋势检验方法的统计量 Z,可进一步依据所设定的显著性水平判定序列趋势的显著性。

3 结果

3.1 新疆降水量的年、季变异性

从图 2 可看出,新疆年降水序列空间变异性小于季节序列;与其他季节相比,南疆南部,即昆仑山山脉一带秋季降水量变异性最大,其他季节降水量变异性相差不大;南疆其他地区以冬季降水量变异性最大,而春季与秋季降水量变异性次之,夏季最小;北疆冬季降水量变异性最大,夏季次之,春季与冬季最小。

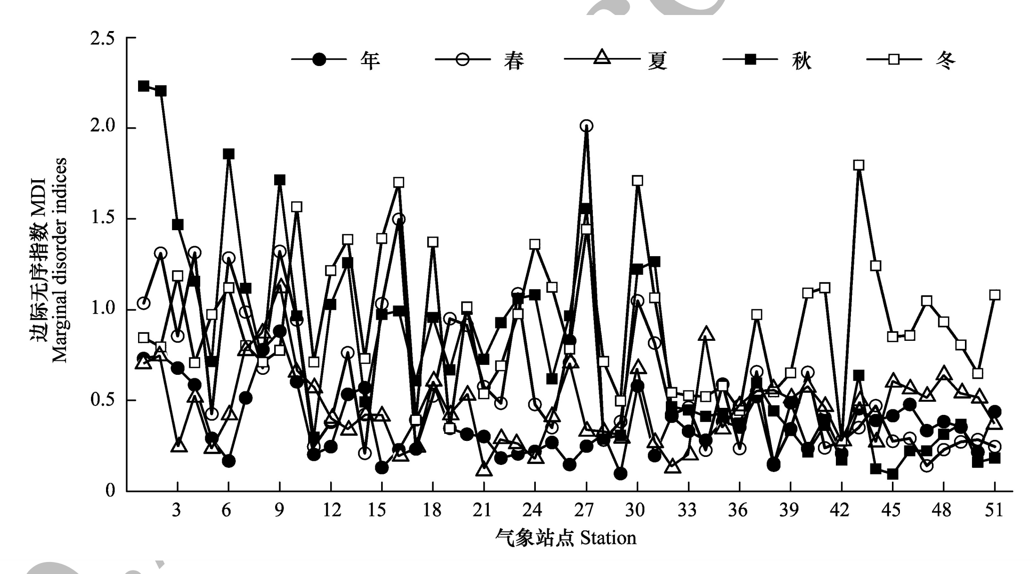


图 2 新疆各气象站年季降水序列边际无序指数(MDI)变化特征

Fig.2 Marginal disorder indices of annual and seasonal precipitation processes in the Xinjiang, China

图 3 为年均降水量与年降水序列边际无序指数空间分布图。从图 3 可看出,以天山山脉为界,北疆年降水量远大于南疆年降水量,其中北疆西部年降水量最大,北疆中部及东部地区其次。以天山山脉为界的南北疆反向的降水变化,说明高耸的天山山脉是造成南北疆降水变化差异的原因[21]。而从年降水量序列边际无序指数空间分布看出,准格尔盆地与天山山脉的年降水无序指数较小,而塔里木盆地西南部与昆仑山山脉指数较大,其中,天山南坡的年降水量无序指数最小,而昆仑山北坡的年降水量无序指数最大。年降水量较大的地区,年降水序列表现出较小的无序性,年降水量与年降水序列的无序性有一定的负相关关系。

3.2 新疆降水量的季节变异性

图 4 显示各季节降水量的边际无序指数空间分布,从图中可以看出春季降水量边际无序指数由东南向西北递减,大致以天山为界,北疆边际无序指数低于南疆;夏季降水量边际无序指数较大的地区主要为新疆边缘

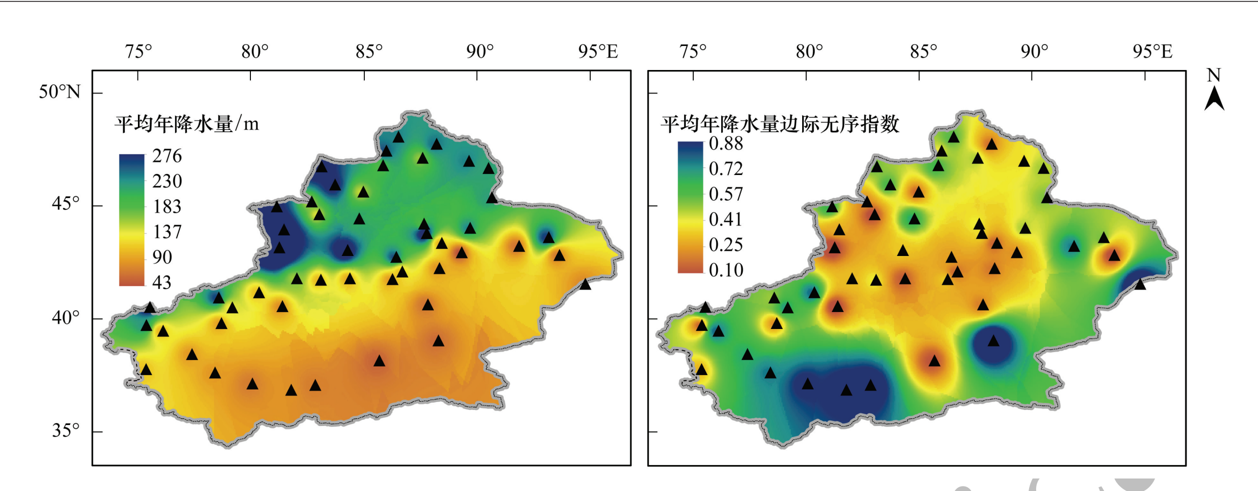


图 3　年降水量空间分布与年降水序列边际无序指数空间分布

Fig.3　Spatial distribution of annual precipitation and marginal disorder indices of annual precipitation across Xinjiang, China

图 4　各季节降水序列的边际无序指数空间分布特征

Fig.4　Spatial patterns of marginal disorder indices of seasonal precipitation changes

地区,边际无序指数较小的地区主要为天山一带,但南疆南部以及北疆东北部也存在少数站点如塔什库尔干和清河,其夏季降水量边际无序指数较小;秋季降水量边际无序指数空间分布与春季大致相同,但最高值比春季高,且最高值的站点为位于昆仑山山脉一带的于田和民丰站;冬季降水量边际无序指数无明显的空间分布规律,但仍以天山为界,北疆冬季降水量边际无序指数以低值为主,而南疆以高值为主。天山西部与准格尔盆地中部的降水量边际无序指数较小,其余地方的降水量边际无序指数较高。

相关研究表明，降水量的增加一方面有利于区域生态与环境的改善，另一方面也同时带来洪水灾害[12]。然而，由于降水增加时空上存在差异，会导致洪旱灾害不同的时空分布特征。除少数站点外，四季的南疆降水量边际无序指数比较高。降水量边际无序指数越高，表明降水越不稳定，降水极有可能聚集在某一时间段发生，而其他时间段无降水，与之相应的洪水干旱也随即发生。这种水资源量的不稳定性，既不利于区域农业灌溉，也容易导致农业经济损失。

3.3 新疆降水量的月变异性

图 5 为新疆 51 个气象站点各季节及各月降水边际无序指数(MDI)。从图 5 看出，全疆范围内春季降水量的边际无序指数小于各月降水边际无序指数，对春季降水量的无序性贡献度最大的月份为 3 月，南疆春季降水量边际无序指数普遍比北疆高，但各月降水量边际无序指数相差较小；南疆秋季降水量无序指数较大的月份为 11 月，较小的月份为 9 月，可知 11 月对秋季降水量无序指数贡献较大，而北疆各月降水量边际无序指数无较大差异；夏季与冬季各月降水量边际无序指数无明显差异。

可见，南疆降水不稳定主要集中在 3 月和 11 月，而对于农业生产比较重要的春、秋季，降水不稳定会导致洪旱灾害风险增大，不利于农业生产。相反，北疆各月的降水量边际无序指数普遍偏小，表明降水相对南疆稳定。据资料显示，北疆的易旱季节主要是夏旱和春夏连旱，主要种植小麦、棉花等作物及园林。北疆降水稳定有利于农业需水量的储存，对于新疆林果业和种植业有积极影响。

3.4 新疆年降水时空分布特征

3.4.1 年降水量与降水天数时间变异性

图 6 为新疆 51 个气象站点 1961—2010 年逐年降水平均分配无序指数。由图 6 看出，1965—1973 年各月降水年内分配差异较大；2001—2006 年降水量年内分配不均匀性较小。降水年内分配不均会导致洪旱灾害风险增加，因此可以判断 1965—1973 年时期发生洪涝及干旱灾害的可能性较大。姜逢清等[22]研究发现新疆 20 世纪 60 年代中至 70 年代中洪灾面积最小，旱灾面积次大的结果，可断定 1965—1973 年时期各月降水年内分配差异较大的具体原因为降水量减少且时空分布不均，所以导致 1965—1973 年时期新疆旱灾比洪灾严重。强度无序指数(IDI)主要表示某年降水天数在不同月份分布的变异性，某时段 IDI 越大，表明该时段降水天数变异性就越大。由图 6 看出，新疆降水天数分布变异较高的年份分别为 1965、1968、1997 和 2007 年。其中 1997 年降水天数分布变异最高，表明 1997 年降水天数分布变异性最大，与张强等[14]研究得出的结论相一致，即从 1987 年开始新疆最大连续降水天数增加，有走向极端的趋势。由此可见，降水天数与降水量年内分布不均在时间尺度上相近。

吴友均等[23]发现新疆 1980 年代中前期主要为洪涝灾害，1980 年代中期至 1990 年代中期洪涝灾害与干旱灾害相当，且相互交替出现，1990 年代中期后则以干旱灾害为主。这与图 6 所示 3 个时期大致相对应：1965—1973 年降水天数无序指数较高，1980—1990 降水天数无序指数波动频繁，1998 年以后出现峰值且波动较大。表明降水量平均分配无序指数 MADI 和降水天数平均强度无序指数 MIDI 越大，降水的时间分配越不均匀，极易导致洪涝干旱灾害的发生。

3.4.2 年降水量与降水天数空间分布变异性分析

图 7 为平均分配无序指数的空间分布及各站点降水量对总降水量贡献率的空间分布特征。由图 7 看出，分配无序指数由新疆南部到北部呈显著减小趋势，表明南疆地区存在较为明显的年内分配不均特征。从降水量对区域总降水量贡献(图 7)看出，各站点降水量对区域总降水量贡献由新疆南部到北部增大特征，表明降水量较小区域降水年内分配更趋不均匀。

图 8 显示新疆降水天数平均强度无序指数的空间分布特征及各站点降水天数对总降水天数贡献率空间分布特征。由图 8 看出，新疆降水天数平均强度无序指数呈现出由新疆南部到北部减小的基本态势，说明南疆地区存在较为明显的降水天数年内分配不均的特征。从各站点降水天数对区域总降水天数的贡献(图 8)



图5 新疆春夏秋冬各季及各月降水序列的边际无序指数 (MDI) 的比较

Fig.5 MDI of seasonal and monthly precipitation changes: spring, summer, autumn and winter across Xinjiang, China

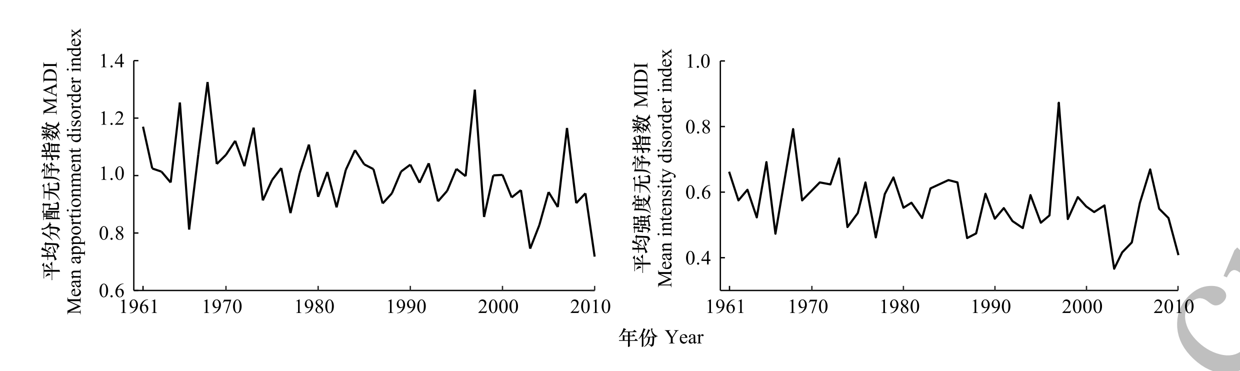


图 6 新疆逐年降水平均分配无序指数(MADI)与逐年降水天数平均强度无序指数(MIDI)的变化

Fig.6 Temporal variations of mean apportionment disorder index (MADI) and mean intensity disorder index (MIDI) in Xinjiang

可以看出,降水天数所占比例呈现出由新疆南部到北部增大的趋势,降水天数与降水量的年内分配不均匀性在空间上表现出较好的一致性。总体而言,降水量和降水天数比例越大,降水量平均分配无序指数和降水天数平均强度指数就越小。相比北疆而言,南疆降水更为不稳定,表明南疆降水时间较为集中,易发生洪旱灾害等极端气象事件,对区域水资源管理及农业生产灌溉产生负面影响,并易造成农业生产损失。

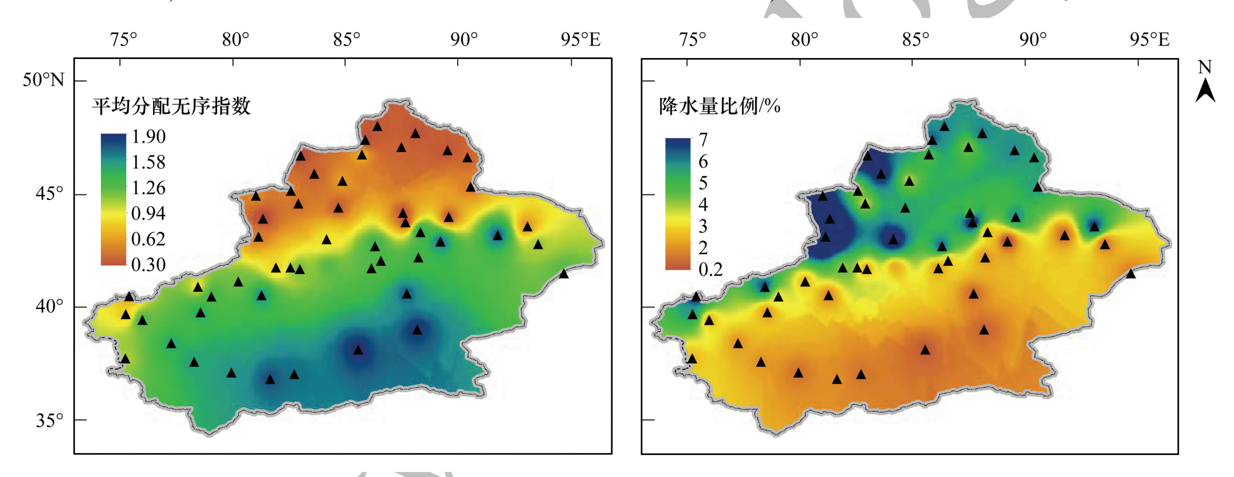


图 7 新疆降水量平均分配无序指数空间特征与各站点降水量贡献率空间特征

Fig.7 Spatial patterns of apportionment disorder index of precipitation, and fractional precipitation contribution of each station to regional precipitation amount over the Xinjiang, China

3.5 新疆降水年代变异性分析

本文将新疆降水时间段分为 5 段:1961—1970,1971—1980,1981—1990,1991—2000 和 2001—2010 年,计算并得出不同时段的降水量平均分配无序指数(MDADI)和降水天数平均强度无序指数(MDIDI)(图 9,图 10)。由图 9、10 可看出,降水量与降水天数年代变异性特征基本一致。在季度尺度来看,1961—1970 与 1991—2000 年春、秋季降水量与降水天数变异性较高;从月时间尺度来看,所有年代 1—3 月降水量与降水天数变异程度较高,而 4—8 月变异程度有下降趋势,9—11 月又呈现出明显上升趋势,最后在 12 月有回落迹象,表明新疆 1—4 月和 9—11 月的降水量和降水天数变异性明显高于其他月份。

纵观不同时间尺度的降水量 MDADI 和降水天数 MDIDI,随着时间推进,降水不稳定性有下降趋势,说明近 10 年降水分布比以往 50a 更均匀,对于农业灌溉和水资源管理有着重要意义。从年内分布看,春、秋季的降水仍不稳定,洪旱灾害较易在 2—4 月和 10—12 月这两个时段内发生,因此,在这两个时段需进一步完善洪旱预测系统及水资源管理,强化这两个时段的防洪抗旱,减少洪旱灾害对农业生产造成的损失。

3.6 年降水变化分配熵无序指数趋势性分析

图 11 为各站点年降水序列无序性变化趋势,可以看出大部分站点年降水序列无序指数呈下降趋势,呈下

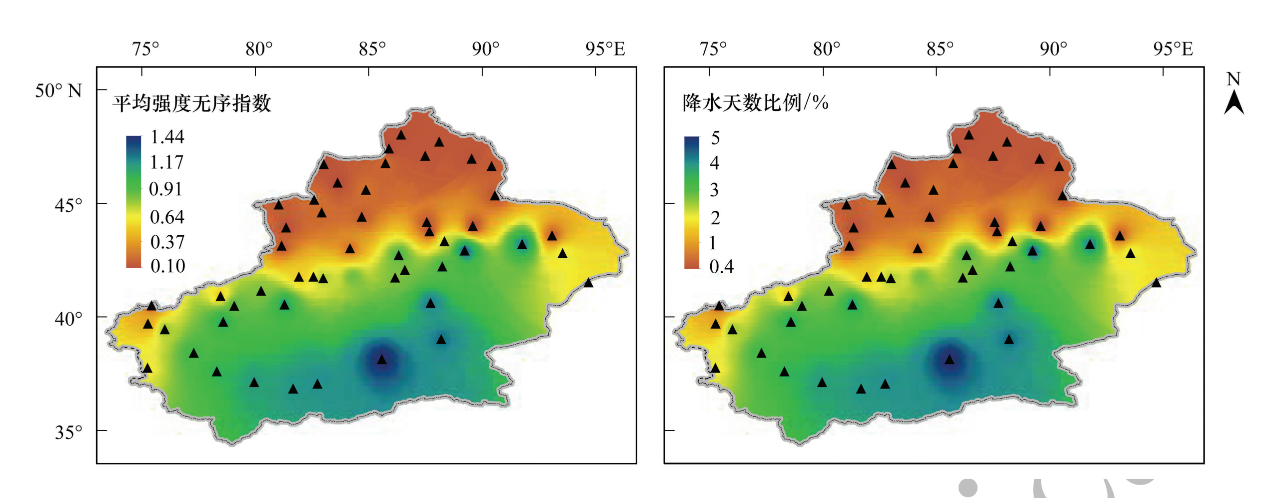


图 8　新疆降水天数平均强度无序指数空间分布与各站点降水天数贡献率空间特征

Fig.8　Spatial pattern of intensity disorder index of the precipitation days, and fractional precipitation contribution of each station to the regional precipitation amount over the Xinjiang, China

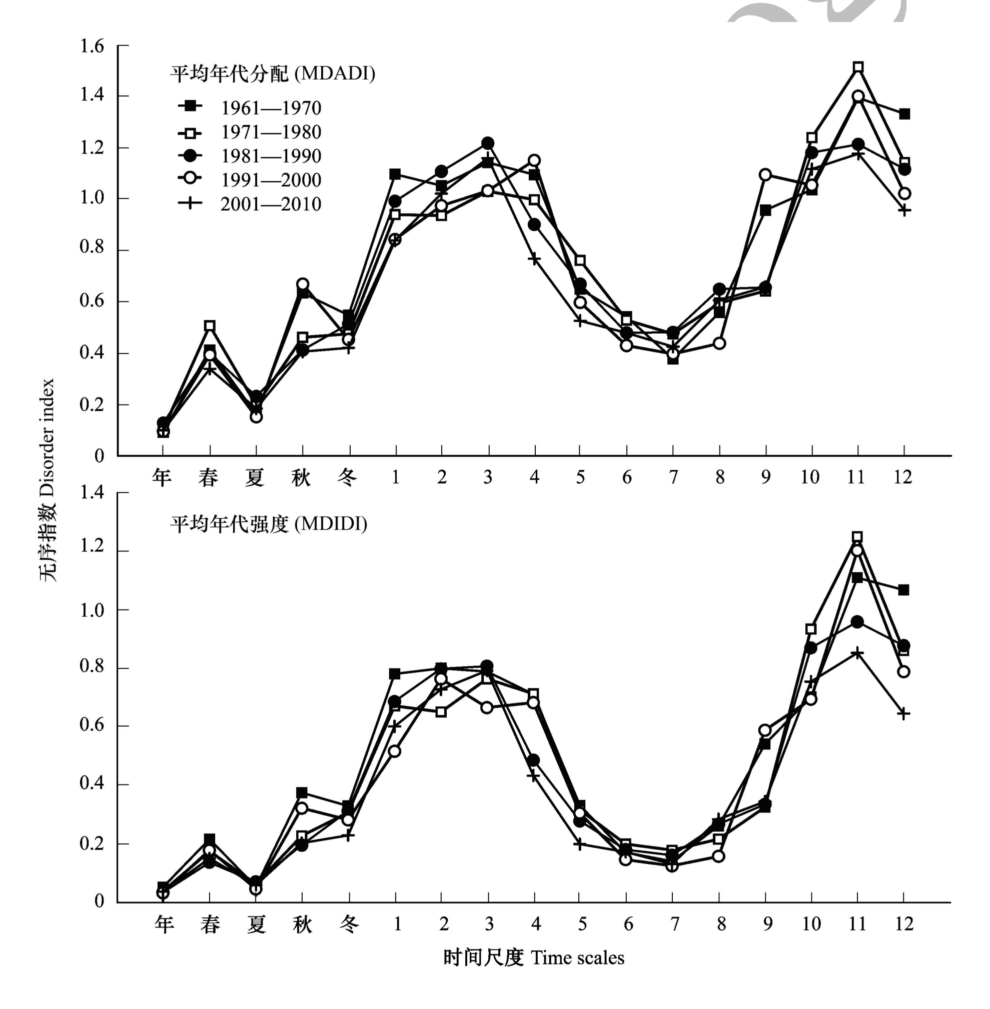


图 9　新疆各年代不同时间尺度上降水量平均年代分配无序指数(MDADI)与降水天数平均年代强度无序指数(MDIDI)

Fig.9　Mean decadal apportionment disorder index (MDADI) and mean decadal intensity disorder index (MDIDI) at different time scales decades in Xinjiang

降趋势的站点有 43 个,占总站点数的 84%,其中通过显著性检验的站点有 30 个,占总站点数的 58.8%,而呈上升趋势的站点有 8 个,占总站点数的 16%,其中通过显著性检验的有 1 个,占总站点数的 1%。呈显著下降

的站点主要分布于南疆南部、天山地区和北疆北部，由此可见，新疆大部分地区降水的无序性将有所减弱，降水有着时空分布均匀化的趋势，干旱与洪涝发生的概率将会减小，有利于新疆大部分地区的农业生产和水资源管理。

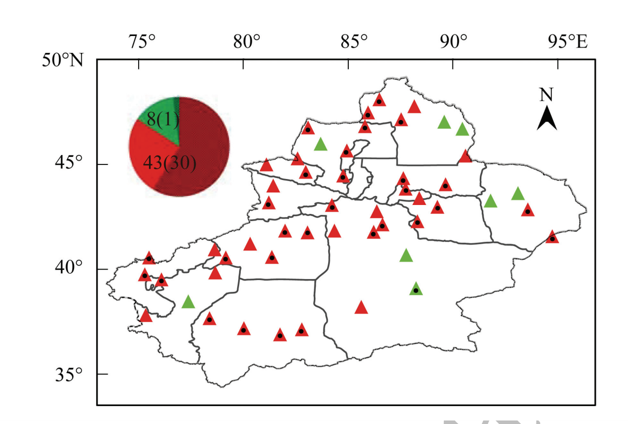


图 10 新疆各站点年降水序列分配熵无序指数变化趋势的 Mann-Kendall 检验

Fig.10 Spatial distribution of MMK-based trends of apportionment disorder index of annual precipitation changes across the Xinjiang, China

图中实心绿色三角形表示上升趋势，实心红色三角形表示下降趋势，内有黑色点的三角形表示显著趋势（置信水平为 95%）

5 结论

本研究基于信息熵理论与 MMK 趋势分析，全面地分析了新疆 1961—2010 年降水的不确定性与时空变化特征，得到如下结论：

（1）新疆降水量变异性：年序列小于季节序列；季节序列小于月序列。说明时间尺度越小，降雨量变异性就越大。平均年降水量越小，平均年降水量边际无序指数越大。

（2）不同季节对降水量的年变异性贡献不同。冬季最高，夏季最小。春、秋季的南疆年降水序列变异性较大，而北疆年降水序列变异性较小，其他季节无明显的空间分布特征。不同月份对季节降水量变异性贡献率也不同，对春季变异性最高的为 3 月，对秋季变异性最高的为 11 月，其余两个季节无明显的月份变异贡献率特别高。

（3）降水量与降水天数年内变异性在时空分布上相近：1965—1973 年时期降水量变异性最大；1965、1997 和 2007 年降水天数变异性最大；降水量变异性与降水天数变异性呈现由南疆至北疆递减的态势，说明南疆存在较为明显的降水量与降水天数不确定性。而不论是降水量还是降水天数的年代变异性，均以夏季和 6、7、8 月较低，11 月份的变异性最高，尤其以 1971—1980 这 10a 最为显著。

（4）新疆各站点降水年内分配的变异性除若羌站有显著增强趋势外，其余各站大多数为显著下降，且主要分布于南疆南部、天山地区和北疆北部。

在一些对新疆气候变化研究中，采用了 EOF、REOF 或聚类方法等，但由于研究对象空间尺度相对太大，只将新疆份为南北疆，新疆境内许多由地形差异产生的更小空间尺度分布特征并没有解释出来。如南庆红等[24]曾用新疆 89 个测站 1960—1998 的年降水资料距平和 1、4、7、10 月的月降水资料距平，通过 EOF 方法将新疆划出年、季尺度上的 3 个降水分区，但分离出的空间分布结构不能清晰表示不同地理区域的特征；辛渝等[21]采用新疆 88 个测站 1961—2006 的月降水资料，通过 EOF 和 REOF 结合得出新疆四季降水量整体异常均表现为全疆一致多（少），或北疆多（少）南疆少（多），或西多（少）东少（多）等 3 种基本结构。这与本文采用信息熵得出的结果一致，说明信息熵在对研究降水变异性有一定的价值。

以上结论说明春、秋季新疆南部降水比北部更不稳定，南疆降水时空分布较为集中，易发生洪旱灾害等极端气象事件，对区域水资源管理及农业生产灌溉产生负面影响，并易造成农业生产损失，因此需要进一步完善洪旱预测系统及水资源管理，强化春、秋季的防洪抗旱，减少洪旱灾害对农业生产造成的损失；在未来的一段时间内，新疆大部分地区降水的无序性将有所变缓，干旱与洪涝发生的概率将会减小，有利于新疆的农业生产和水资源管理。

参考文献（References）：

［1］ Ziegler Alan D, Sheffield Justin, Maurer Edwin P, Nijssen Bart, Wood Eric F, Lettenmaier Dennis P. Detection of intensification in global- and continental-scale hydrological cycles: Temporal scale of evaluation. Journal of Climate, 2003, 16(3): 535-547.

［2］ Zhang Q, Li J F, Chen Y D, Chen X H. Observed changes of temperature extremes during 1960—2005 in China: Natural or human-induced

variations?. Theoretical and Applied Climatology, 2011, 106(3/4): 417-431.

[3] Zhang Q, Xu C Y, Chen Y D, Ren L L. Comparison of evapotranspiration variations between the Yellow River and Pearl River basin, China. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2011, 25(2): 139-150.

[4] Gao G, Chen D L, Xu C Y, Simelton Elisabeth. Trend of estimated actual evapotranspiration over China during 1960—2002. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(D11): D11120, doi: 10.1029/2006JD008010.

[5] Milly P C D, Wetherald R T, Dunne K A, Delworth T L. Increasing risk of great floods in a changing climate. Nature, 2002, 415(6871): 514-517.

[6] 施能, 黄先香, 杨扬. 1948—2000 年全球陆地年降水量场趋势变化的时、空特征. 大气科学, 2003, 27(6): 971-982.

[7] Zhai P M, Sun A, Ren F, Liu X N, Gao B, Zhang Q. Changes of climate extremes in China. Climate Change, 1999, 42(1): 203-218.

[8] Mishra Ashok K, Ozger Mehmet, Singh Vijay P. An entropy-based investigation into the variability of precipitation. Journal of Hydrology, 2009, 370(1/4): 139-154.

[9] Buhe Aosier, Tsuchiya K, Kaneko M, Ohtaishi N, Halik Mahmut. Land cover of oases and forest in Xinjiang, China retrieved from ASTER data. Advances in Space Research, 2007, 39(1): 39-45.

[10] 杨莲梅. 新疆极端降水的气候变化. 地理学报, 2003, 58(4): 577-583.

[11] 薛燕, 韩萍, 冯国华. 半个世纪以来新疆降水和气温的变化趋势. 干旱区研究, 2003, 20(2): 127-130.

[12] 姜逢清, 朱诚, 胡汝骥. 1960-1997 年新疆北部降水序列的趋势探测. 地理科学, 2002, 22(6): 669-672.

[13] 张生军, 王天明, 王涛, 卢爱刚, 葛剑平. 新疆近 50a 来降水量时空变化及其突变分析. 中国沙漠, 2010, 30(3): 668-674.

[14] Zhang Q, Li J F, Singh Vijay P, Xu C Y, Bai Y G. Changing structure of the precipitation process during 1960—2005 in the Xinjiang, China. Theoretical and Applied Climatology, 2012, 110(1/2): 229-244.

[15] 张强, 李剑锋, 陈晓宏, 白云岗. 基于 Copula 函数的新疆极端降水概率时空变化特征. 地理学报, 2011, 66(1): 3-12.

[16] 李剑锋, 张强, 陈晓宏, 白云岗. 新疆极端降水概率分布特征的时空演变规律. 灾害学, 2011, 26(2): 11-17.

[17] Zhang Q, Xu C -Y, Chen X H, Zhang Z X. Statistical behaviors of precipitation regimes in China and their links with atmospheric circulation 1960—2005. International Journal of Climatology, 2011, 31(11): 1665-1678.

[18] Hamed K H, Rao A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. Journal of Hydrology, 1998, 204(1/4): 182-196.

[19] Mitchell J M, Dzerdzeevskii B, Flohn H, Hofmeyer W L, Lamb H H, Rao K N, Wallen C C. Climate Change. WHO Technical Note 79, World Meteorological Organization: Geneva, 1966: 79.

[20] Hamed Khaled H. Trend detection on hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. Journal of Hydrology, 2007, 349(3/4): 350-363.

[21] 辛渝, 毛炜峄, 李元鹏, 张新, 卢戈, 博力健. 新疆不同季节降水气候分区及变化趋势. 中国沙漠, 2009, 29(5): 948-959.

[22] 姜逢清, 朱 诚, 胡汝骥. 新疆 1950— 1997 年洪旱灾害的统计与分形特征分析. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 96-100.

[23] 吴友均, 师庆东, 常顺利. 1961—2008 年新疆地区旱涝时空分布特征. 高原气象, 2011, 30(2): 391-396.

[24] 南庆红, 杨舵, 杨青. 应用 EOF 方法分析新疆降水变化特征. 中国沙漠, 2003, 23(5): 554-559.